

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Mécanique

Laboratoire de Génie Mécanique et de Développement

Mémoire de Master

Pour l'obtention du diplôme de Master en énergétique

ETUDE Technico-économique d'un moteur dédié GNC

Réalisé par :

Mohamed Amine BENOUHLIMA

Sous la direction de :

M. Saïd RECHAK (Professeur, ENP Alger)

M. Arezki SMAILI (Professeur, ENP Alger)

M. Mohamed BENBRAIKA (Docteur, ENP Alger)

Présenté et soutenu publiquement le 28/06/2016

Composition du Jury :

Président M. Brahim GUERGUEB, Docteur ENP Alger

Promoteur M. Saïd RECHAK, Professeur ENP Alger

Promoteur M. Arezki SMAILI, Professeur ENP Alger

Promoteur M. Mohamed BENBRAIKA, Docteur ENP Alger

Examineur M. Mohamed BOUBAKEUR, Docteur ENP Alger

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Mécanique

Laboratoire de Génie Mécanique et de Développement

Mémoire de Master

Pour l'obtention du diplôme de Master en énergétique

ETUDE Technico-économique d'un moteur dédié GNC

Réalisé par :

Mohamed Amine BENOUHLIMA

Sous la direction de :

M. Saïd RECHAK (Professeur, ENP Alger)

M. Arezki SMAILI (Professeur, ENP Alger)

M. Mohamed BENBRAIKA (Docteur, ENP Alger)

Présenté et soutenu publiquement le 28/06/2016

Composition du Jury :

Président M. Brahim GUERGUEB, Docteur ENP Alger

Promoteur M. Saïd RECHAK, Professeur ENP Alger

Promoteur M. Arezki SMAILI, Professeur ENP Alger

Promoteur M. Mohamed BENBRAIKA, Docteur ENP Alger

Examineur M. Mohamed BOUBAKEUR, Docteur ENP Alger

-ENP 2016-

Remerciements :

Je remercie avant tout Allah le tout puissant de nous avoir donné la foi, la santé et la volonté de mener à bien notre projet.

Je remercie chaleureusement mes promoteurs Professeur Arezki SMAILLI, Professeur Saïd RÉCHAK, Docteur Mohamed BENBRAÏKA dont le rôle fut primordial. Au-delà de leurs précieux conseils scientifiques, je retiendrai longtemps leurs grandes qualités humaines, la confiance qu'ils m'ont accordée ainsi que leurs disponibilité permanente. Sans eux, ce travail n'aurait pas la même saveur.

Je remercie aussi les membres du jury, Monsieur le président de jury Brahim GUERGUEB, Monsieur l'examinateur Mohamed BOUBAKEUR, d'avoir pris le temps et le soin de lire notre document.

Mes remerciements vont également vers tous les enseignants de l'École Nationale Polytechnique. Merci d'avoir donné autant de vos personnes pour notre formation.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à petite ou grande échelle, de près ou de loin à la réalisation de ce manuscrit particulièrement à mon cher ami Ibrahim.

ملخص :

الهدف من هذا العمل هو إجراء دراسة تقنية واقتصادية لمحرك مخصص للغاز الطبيعي المضغوط. لهذا الغرض بدأنا بتوضيح تقنية تحويل محرك الديزل الى محرك الغاز الطبيعي المضغوط، ثم قمنا بدراسة اقتصادية من أجل التوصل إلى التكلفة النهائية للتحويل.

الكلمات المفتاحية: الغاز الطبيعي المضغوط، محرك CNG مخصصة، الدراسة الفنية والاقتصادية.

abstract:

The aim of this work is to make a technical and economic study of an engine dedicated CNG. for this purpose, we started by showing the conversion technique from a diesel engine to a 100% CNG engine, then an economic study was done in order to arrive to the total cost of the conversion.

Keyword: Compressed Natural Gas, CNG engine dedicated, technical and economic study

Résumé :

Le but de ce travail est de faire une étude technico-économique d'un moteur dédié Gaz naturel comprimé, à cet effet, nous avons commencé par, montrer la technique de conversion d'un moteur diesel en un moteur à 100% Gaz naturel comprimé. Par la suite une étude économique a été faite dont le but d'aboutir au coût total de la conversion.

Mot clé : Gaz naturel comprimé, Moteur dédié GNC, étude technico-économique

Table Des Matières

Introduction Générale.....	7
Chapitre 01 Caractéristique du gaz naturel comme carburant	8
1.1 Propriétés physico-chimiques.....	8
1.2 Propriétés liées à la combustion	9
1.3 Propriétés liées à la pollution.....	11
1.4 Stockage du GNV sur véhicule	11
1.5 Conclusion.....	12
Chapitre 02 Utilisation du GNC dans les véhicules particuliers.....	13
2.1 Exemples d'application du GNC aux véhicules particuliers [4]	13
2.2 Conclusion.....	20
Chapitre 3 Technique de conversion des moteurs à combustion interne en dédié GNC	21
3.1 Conversion des moteurs diesel en dédié GNC [5].....	21
3.1.1 Les modifications nécessaire au niveau des organes du moteur.....	21
3.1.2 Composants de kit.....	23
3.1.3 Système de stockage du Gaz en haute pression	24
3.1.4 Moyen d'amélioration de performance.....	24
3.2 Conclusion.....	24
Chapitre 04 Etude économique de la conversion du moteur Diesel en dédié GNC.....	25
4.1 Estimation du coût de la conversion.....	25
4.1.1 Coût des modifications nécessaires au niveau des organes de moteur	25
4.1.2 Coût du Kit de conversion et le système de stockage :[6][7]	26
4.1.3 Le coût global de la transformation	27
4.2 Conclusion.....	27
Conclusion Générale	28
Références bibliographiques	29

Liste des figures :

Figure 2. 1 Caractéristiques techniques de la CADDY MAX	14
Figure 2. 2 Caractéristiques techniques de la CADDY	14
Figure 2. 3 Caractéristiques techniques de la Eco-Up	14
Figure 2. 4 Caractéristiques techniques de la Golf Tgi	14
Figure 2. 5 Caractéristiques techniques de la Golf Variant Tgi	15
Figure 2. 6 Caractéristiques techniques de la Skoda Octavia	15
Figure 2. 7 Caractéristiques techniques de la Seat Leon Tgi	15
Figure 2. 8 Caractéristiques techniques de la Seat Mii	15
Figure 2. 9 Caractéristiques techniques de la Audi A3 G-Tron	16
Figure 2. 10 Caractéristiques techniques de la Skoda Citigo	16
Figure 2. 11 Caractéristiques techniques de la Opel Zafira 1.6 Turbo GNC	16
Figure 2. 12 Caractéristiques techniques de la Opel Zafira Tourer 1.6 Turbo GNC	17
Figure 2. 13 Caractéristiques techniques de la Opel Combo Tour GNC	17
Figure 2. 14 Caractéristiques techniques de la Fiat 500L	17
Figure 2. 15 Caractéristiques techniques de la Fiat 500L Living	17
Figure 2. 16 Caractéristiques techniques de la Fiat Panda	18
Figure 2. 17 Caractéristiques techniques de la Fiat Punto	18
Figure 2. 18 Caractéristiques techniques de la Fiat Qubo	18
Figure 2. 19 Caractéristiques techniques de la Fiat Doblo	18
Figure 2. 20 Caractéristiques techniques de la Iveco Daily GNC	19
Figure 2. 21 Caractéristiques techniques de la Mercedes Benz B 200 NGT	19
Figure 2. 22 Caractéristiques techniques de la Mercedes Benz E 200 NGT	19
Figure 2. 23 Caractéristiques techniques de la Volvo V60	19
Figure 2. 24 Caractéristiques techniques de la Lancia Ypsilon	20
Figure 2. 25 Caractéristiques techniques de la Suzuki Vitara	20

Liste des tableaux :

Tableau 4. 1 Coût de la modification des pistons du moteur	25
Tableau 4. 2 coût de la modification du la culasse.....	25
Tableau 4. 3 coût de la modification du la soupape à papillon	26
Tableau 4. 4 coût de la modification des sièges des soupapes	26
Tableau 4. 5 Prix du kit et le système de stockage.....	26
Tableau 4. 6 Devis d'une conversion en dédié GNC.....	27



Introduction Générale

Le développement technologique a fait de notre quotidien un confort irremplaçable. Particulièrement le secteur de transport qui ne cesse de s'améliorer depuis des années, voire des siècles. Ce confort n'est pas sans prix, les moyens de transport sont alimentés par des sources d'énergie qui continuent de puiser, menaçant la situation économique des sociétés dont la dépendance des énergies fossiles ne cesse de croître. L'environnement est aussi sensible à cette exploitation excessive des hydrocarbures, la pollution fait partie de notre quotidien, le nombre de maladies dues à cette dernière est beaucoup plus important que l'on pense, sans parler de l'effet de serre qui menace notre planète jour après jour. Le défi est donc à relever, toute transition vers des moyens moins polluants et aussi efficaces est l'objectif des ingénieurs et des chercheurs du domaine. Cependant, le choix d'une transition n'est pas une décision à prendre pour des raisons environnementales uniquement, mais la réalité est aussi dans l'économie. Ce qui est plus intéressant, c'est d'associer au changement des motifs aussi bien économiques qu'environnementaux, pour s'adapter le plus avec les moyens financiers tout en respectant le mieux possible la nature.

Dans l'optique de contribuer à une étude de cette transition, on s'intéresse dans le présent travail à mettre en évidence une étude économique relative à l'utilisation du gaz naturel comprimé (GNC) comme alternative des carburants traditionnels (Essence, Diesel). Pour cela, on montrera les techniques de conversion d'un moteur Diesel en un moteur dédié GNC, où des modifications seront introduites sur les différents organes. Pour ce faire, on a réparti notre travail en quatre chapitres. Le premier, est consacré aux caractéristiques du Gaz naturel où on a proposé une analyse des caractéristiques physico-chimiques et de réduction de polluants du GNC, et aussi on a abordé le problème de stockage du GNV sur véhicule.

Ensuite dans le second chapitre On a cité quelques exemples d'application actuelle du GNC pour les véhicules particuliers.

Les troisième et quatrième chapitres sont les plus importants dans notre manuscrit, on a fait une étude technique dans le chapitre 03 où on a présenté la technique de conversion du moteur Diesel en moteur dédié GNC. On a poursuivi cette étude par une étude économique dans le chapitre 04 où on a fait des estimations financières pour la transformation d'un moteur Diesel en moteur dédié GNC. On termine ce travail par une conclusion résumant l'ensemble du travail réalisé et en incluant des perspectives.

Chapitre 01 Caractéristique du gaz naturel comme carburant

Le gaz naturel est une importante source d'énergie primaire. Sa production mondiale actuelle est proche de 2 milliards de tonnes équivalentes de pétrole, tep ($1000 \text{ m}^3 = 0.85 \text{ tep}$) ce qui représente 60% de celle de pétrole brut. Les réserves gazières, estimées aujourd'hui à environ 150 milliards de tep, sont du même ordre de grandeur que celles du pétrole. Elles présentent, entre autres, le grand avantage d'être plus uniformément réparties sur le globe [1].

Dans le passé le gaz naturel a toujours été utilisé dans les secteurs domestiques et industriels. Les applications dans le domaine des transports sont restées extrêmement faibles. Cependant depuis le début des années 1990 [2], le gaz naturel a commencé à être utilisé comme carburant (GNV- Gaz Naturel pour Véhicules), tout d'abord pour des questions de diversification énergétique puis pour des soucis écologiques. Le GNV devient le carburant propre par excellence.

Nous proposons ici, une analyse des caractéristiques physico-chimiques et de réduction de polluants de ce prometteur carburant. Enfin, nous abordons le problème de stockage du GNV sur véhicule.

1.1 Propriétés physico-chimiques

Le gaz naturel est constitué dans sa majeure partie de méthane, CH_4 , (entre 80 et 98% en volume suivant la provenance), la fraction restante est composée de dioxyde de carbone (CO_2), d'azote (N_2), d'éthane (C_2H_6), de propane (C_3H_8) et de butane (C_4H_{10}). La composition du gaz naturel varie en fonction de sa provenance. Ce fait peut engendrer des répercussions néfastes sur la qualité de la combustion et sur l'émission de polluants. L'adoption d'un système de contrôle fiable et précis de la richesse du mélange devient impératif car la richesse reste le paramètre le plus influent sur les émissions polluantes et sur la puissance développée à pleine charge.

A la pression atmosphérique, dès que la température est supérieure à -160°C , ce carburant est en phase gazeuse. Le problème de mouillage de parois rencontré avec des carburants liquides est donc évité, les difficultés liées à la vaporisation des carburants liquides sont absentes et les temps de mélange sont donc plus courts. En revanche, dans le cas d'une utilisation en injection indirecte, le risque de retour de la flamme à l'admission doit être pris en compte (adaptation éventuelle de la distribution). De plus, si le gaz est introduit dans le moteur simultanément avec l'air, le gaz occupera de l'ordre de 10% du volume, le taux de remplissage

diminue donc considérablement ainsi que le couple disponible. Une façon de résoudre ce problème est d'injecter directement le gaz dans le cylindre après la fermeture de la soupape d'admission (injection directe). La densité du méthane est de 0.65 par rapport à l'air, ce qui est à comparer à 4 pour les vapeurs d'un combustible liquide. Le fait que GNV soit moins lourd que l'air, contrairement aux vapeurs de combustible liquide, change complètement les conditions de mélange dans une chambre de combustion, notamment les forces de flottabilité. Dans les conditions standards de température et pression (293 K et 1.013 bar), le coefficient de diffusion moléculaire du méthane dans l'air est de 0.21 cm²/s. Dans les mêmes conditions, les diffusions moléculaires dans l'air de l'iso-pentane et du méthyl- 2pentane, qui interviennent dans la composition du super carburant, sont respectivement de 0.0855 et 0.078 cm²/s [18]. Nous constatons que le méthane diffuse beaucoup mieux que les autres carburants, ce qui favorise l'homogénéisation du mélange, et peut donc induire des problèmes dans la maîtrise de la stratification.

Le pouvoir calorifique massique représente la quantité d'énergie dégagée par unité de masse de carburant lors d'une combustion complète, conduisant à la formation uniquement de CO₂ et H₂O, en partant de conditions initiales normales de température et pression. Le pouvoir calorifique supérieure (PCS) et inférieure (PCI) sont définis selon que l'eau obtenue se trouve à l'état liquide ou gazeux respectivement. Dans les cas des moteurs, l'eau est toujours rejetée sous forme de vapeur. Le PCI du méthane est de 50.01 MJ/kg par rapport à 42.69 MJ/kg pour l'essence. A rendement égal, la consommation massique d'un moteur à GNV est donc plus basse.

Une autre grandeur très importante pour les motoristes est la notion de contenu énergétique par unité de volume de mélange carburé pour une richesse donnée. Pour un mélange stoechiométrique, le mélange méthane-air présente 3.10 kJ/m³ et celui essence-air 3.46 kJ/m³. La charge admise dans les cylindres étant fixée par la cylindrée du moteur, l'utilisation de gaz naturel mélangé avec l'air préalablement à l'admission tend à diminuer de l'ordre de 10% la puissance maximale d'un moteur.

1.2 Propriétés liées à la combustion

Il n'est pas possible de réaliser sur le moteur monocylindrique (moteur CFR ou Cooperative Fuel Research) les mesures normalisées d'indice d'octane RON (*Research Octane Number, caractérise le comportement d'un carburant à bas régime ou lors des accélérations*) ou MON (*Motor Octane Number, évalue la résistance d'un carburant au cliquetis à haut régime*) du méthane. Une

estimation par extrapolation mène respectivement aux valeurs 130 et 115. Cet excellent comportement vis-à-vis du cliquetis permet d'augmenter le taux de suralimentation pour les moteurs fonctionnant au GNV. En effet les taux de suralimentation sont souvent limités par la faible résistance à l'auto-inflammation des carburants. De la même manière, le taux de compression peut être augmenté, et par conséquent le rendement thermodynamique du moteur sera plus élevé. A contrario, cette propriété empêche l'utilisation du GNV dans un moteur à allumage par compression avec fort rapport volumétrique, type Diesel, car l'allumage du mélange serait très difficile sans bougie. Cette obligation de fonctionner en allumage commandé limite un peu le taux de compression maximale possible à cause de l'emplacement de la bougie d'allumage. Il est donc possible de choisir un taux de compression intermédiaire entre les valeurs classiques pour l'allumage commandé et pour les moteurs Diesel. Ceci permet de gagner en rendement thermodynamique par rapport aux moteurs à essence et de ne pas être trop pénalisé par rapport aux moteurs Diesel.

Les limites d'inflammabilité théoriques du mélange méthane-air exprimées en termes de richesse sont 0.5 et 1.7, par rapport à 0.6 et 3.8 pour le cas d'isooctane-air, pour des conditions normales de température et pression. Le fait de posséder une limite inférieure d'inflammabilité plus faible autorise un fonctionnement du moteur GNV en mélange plus pauvre.

L'énergie minimale d'allumage d'un mélange méthane-air de richesse 1 est de 0.33 mJ aux conditions normales de température et pression. Cette valeur est nettement plus élevée que celle des autres hydrocarbures. Un moteur au GNV impliquera par conséquent le choix d'un système d'allumage plus puissant, assurant par exemple une énergie de 100 à 120 mJ contre 30 à 40 mJ sur les moteurs à essence classiques. La combustion du méthane est lente. La vitesse laminaire de combustion à richesse 0.8 est de 30 cm/s alors que celle de l'iso-octane est de 37 cm/s dans les mêmes conditions de mélange. Cette particularité peut constituer un facteur de détérioration des performances, notamment au niveau du couple disponible, à cause de l'augmentation des pertes de chaleur aux parois. En revanche, cette tendance pourra être atténuée, en faisant appel à une haute turbulence et à une maîtrise des écoulements structurés dans le moteur. D'autre part la combustion moins rapide du méthane peut conduire à une diminution du bruit de combustion car les gradients de pression sont moins prononcés.

1.3 Propriétés liées à la pollution

L'essence et le gasoil sont des mélanges complexes d'hydrocarbures, incluant des aromatiques, des paraffines, des oléfines et des naphthènes. L'essence contient typiquement des hydrocarbures ayant 5 à 12 atomes de carbone et le gasoil 12 à 18. Lors d'une combustion incomplète, ces carburants forment aisément des composants partiellement oxydés et des suies. A contrario, le méthane, avec sa composition très simple (un atome de carbone et quatre d'hydrogène), produit essentiellement, dans le cas de combustions incomplètes, du méthane, qui n'est pas toxique [3].

La dilution (rapport massique air-carburant) pour le méthane dans les conditions de stœchiométrie est de 17.2, tandis que celui de l'essence sans plomb est de l'ordre de 9.9. D'autre part, le rapport entre le nombre d'atomes d'hydrogène et le nombre d'atomes de carbone (H/C) est bien plus élevé pour le CH₄ que pour l'essence. Cette dernière particularité conduit à une diminution considérable des émissions des produits carbonés. A titre d'exemple, la masse de CO₂ émise par gramme de carburant lors d'une combustion stœchiométrique complète est de 2.75 grammes pour le méthane et de 3.18 grammes pour un supercarburant commercial. De même, en mélange riche, la teneur en monoxyde de carbone (CO), qui peut éventuellement être produit dans un moteur à GNV, est aussi plus faible.

1.4 Stockage du GNV sur véhicule

L'essence sans plomb à la pression atmosphérique et à 293 K est sous forme liquide et présente une masse volumique de 750 kg/m³, le méthane dans les mêmes conditions est à l'état gazeux et possède une masse volumique de 0.65 kg/m³. Cette propriété constitue la principale faiblesse du GNV pour une utilisation sur véhicule. Utiliser des réservoirs de mêmes dimensions que ceux qui sont utilisés dans les voitures à essence dans les mêmes conditions de pression conduirait à une autonomie inférieure à 1 km. Ainsi, il ne reste que trois solutions :

- Amener de GNV à l'état liquide (GNL- Gaz Naturel Liquéfié), ce qui impliquerait de baisser la température à moins de -160°C ;
- Stocker le gaz par effet de surface sur du charbon actif à une pression de l'ordre de 20 bar (GNA- Gaz Naturel Adsorbé) ;
- Comprimer énormément le GNV (GNC-Gaz Naturel Comprimé) de manière à augmenter à sa masse volumique.

La première solution est encore en phase expérimental en Europe. Le GNA, constitue une solution prometteuse, car elle permet l'utilisation d'une pression de stockage réduite, toutefois elle n'est qu'en phase de développement. La solution GNC est la plus répandue actuellement dans le monde.

La solution classique consiste à utiliser une pression de stockage de 200 bar. On pourrait envisager une pression supérieure, mais en augmentant la pression de stockage, le réservoir va s'alourdir, car il doit pouvoir supporter les contraintes internes dues à la pression.

Les réglementations imposent que les réservoirs puissent résister à une pression trois fois supérieure à celle de stockage. De la recherche effectuée dans ce domaine a résulté une pression optimale de stockage de 200 bar quel que soit le matériel utilisé.

En ce qui concerne les matériaux utilisés par la réalisation des réservoirs, les composites sont ceux qui présentent le coefficient *masse du réservoir/volume utile de carburant stocké* le plus faible, ce qui conduit à une diminution du poids total par rapport aux réservoirs en acier ou en aluminium.

Les risques dus au stockage du GNV à haute pression, en cas de fuite de gaz, sont en réalité beaucoup moins importants qu'on ne le pense généralement. En effet le méthane, nettement plus léger que l'air, diffuse rapidement et possède une plage d'inflammabilité très réduite, donc la probabilité d'obtenir un mélange inflammable est réduite.

En cas d'incendie une soupape de sécurité s'ouvre dès que la pression dépasse 350 bar. Le fait que le réservoir puisse résister à 600 bar prémunit, ainsi, contre le risque de rupture des parois et d'explosion.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu les propriétés physico-chimiques du gaz naturel, pour mettre en évidence l'excellence de ce carburant comparé à d'autres. Ses propriétés nous ont permis de voir le grand nombre d'avantages qu'il présente, énergétiquement et écologiquement, il est donc l'une des solutions primaires pour répondre à la crise énergétique que le monde vit actuellement.

Le problème de stockage a aussi fait l'objet d'une partie de ce chapitre, où un ensemble de solutions a été illustré.

Chapitre 02 Utilisation du GNC dans les véhicules particuliers

Les recherches dans le domaine du gaz naturel comme carburant entrepris par les principaux constructeurs au cours de la dernière décennie, ont abouti à de nombreuses solutions technologiques. Actuellement, il existe plusieurs modèles de véhicules particuliers équipés au GNC.

Dans la plupart des cas, ces moteurs sont adaptés à partir d'une base essence ou diesel. Le GNC est stocké dans le réservoir à une pression maximale de 200 bar. Le circuit d'alimentation comporte un détendeur qui ramène le gaz à la pression d'injection (entre 2.5 et 8 bar, selon les constructeurs). Cette détente provoque une chute de la température, ce qui oblige la mise en place d'un circuit de chauffage en parallèle. Le carburant arrive ensuite dans la rampe d'injection, où le dosage de carburant dans les chambres de combustion peut être effectué à partir d'injecteurs électromagnétiques spécifiques au GNC et directement pilotés par le calculateur. L'injection indirecte multipoint séquentielle et les culasses multisoupapes sont les solutions retenues actuellement. Ces moteurs fonctionnent normalement à la stœchiométrie, à cause de l'utilisation des catalyseurs trois voies. L'implantation du réservoir sur véhicule est faite au détriment soit de l'habitabilité soit du volume du coffre (on détaillera ces brèves explications dans le chapitre 3).

2.1 Exemples d'application du GNC aux véhicules particuliers [4]

Nous présentons maintenant, quelques modèles de voitures particulières équipées au gaz naturel.

Un nombre croissant de constructeurs automobiles offre des voitures équipées au gaz naturel, on citera comme exemple : Volkswagen, Mercedes Benz, Skoda, Seat, Audi, Opel, Fiat, Iveco, Volvo, Lancia, Suzuki.

Ci-dessous les figures, montrant des modèles de voitures fonctionnant à 100% à GNC.

- Volkswagen CADDY MAX

<p>Puissance du moteur : 80 kW Capacité du GNC : 37 kg Capacité du carburant : 13 L Autonomie avec du GNC : 630 km Autonomie avec l'essence : 130 km Emission du CO₂ : 157 g/km</p>	
---	--

Figure 2. 1 Caractéristiques techniques de la CADDY MAX

- Volkswagen CADDY

<p>Puissance du moteur : 80 kW Capacité du GNC : 26 kg Capacité du carburant : 13 L Autonomie avec du GNC : 450 km Autonomie avec l'essence : 130 km Emission du CO₂ : 156 g/km</p>	
---	---

Figure 2. 2 Caractéristiques techniques de la CADDY

- Volkswagen Eco-Up

<p>Puissance du moteur : 50 kW Capacité du GNC : 11 kg Capacité du carburant : 10 L Autonomie avec du GNC : 380 km Autonomie avec l'essence : 220 km Emission du CO₂ : 79 g/km</p>	
--	--

Figure 2. 3 Caractéristiques techniques de la Eco-Up

- Volkswagen Golf Tgi

<p>Puissance du moteur : 81 kW Capacité du GNC : 15 kg Capacité du carburant : 50 L Autonomie avec du GNC : 420 km Autonomie avec l'essence : 940 km Emission du CO₂ : 94 g/km</p>	
--	--

Figure 2. 4 Caractéristiques techniques de la Golf Tgi

- Volkswagen Golf Variant Tgi

<p>Puissance du moteur : 81 kW Capacité du GNC : 16 kg Capacité du carburant : 51 L Autonomie avec du GNC : 430 km Autonomie avec l'essence : 970 km Emission du CO₂ : 95 g/km</p>	
--	--

Figure 2. 5 Caractéristiques techniques de la Golf Variant Tgi

- Skoda Octavia

<p>Puissance du moteur : 81 kW Capacité du GNC : 15 kg Capacité du carburant : 50 L Autonomie avec du GNC : 410 km Autonomie avec l'essence : 920 km Emission du CO₂ : 97 g/km</p>	
--	---

Figure 2. 6 Caractéristiques techniques de la Skoda Octavia

- Seat Leon Tgi

<p>Puissance du moteur : 81 kW Capacité du GNC : 15 kg Capacité du carburant : 50 L Autonomie avec du GNC : 400 km Autonomie avec l'essence : 940 km Emission du CO₂ : 94 g/km</p>	
--	--

Figure 2. 7 Caractéristiques techniques de la Seat Leon Tgi

- Seat Mii

<p>Puissance du moteur : 50 kW Capacité du GNC : 11 kg Capacité du carburant : 10 L Autonomie avec du GNC : 380 km Autonomie avec l'essence : 200 km Emission du CO₂ : 79 g/km</p>	
--	--

Figure 2. 8 Caractéristiques techniques de la Seat Mii

- Audi A3 G-Tron

<p>Puissance du moteur : 81 kW Capacité du GNC : 14 kg Capacité du carburant : 50 L Autonomie avec du GNC : 400 km Autonomie avec l'essence : 900 km Emission du CO₂ : 94 g/km</p>	
--	--

Figure 2. 9 Caractéristiques techniques de la Audi A3 G-Tron

- Skoda Citigo

<p>Puissance du moteur : 50 kW Capacité du GNC : 12 kg Capacité du carburant : 10 L Autonomie avec du GNC : 400 km Autonomie avec l'essence : 200 km Emission du CO₂ : 79 g/km</p>	
--	---

Figure 2. 10 Caractéristiques techniques de la Skoda Citigo

- Opel Zafira 1.6 Turbo GNC

<p>Puissance du moteur : 110 kW Capacité du GNC : 21 kg Capacité du carburant : 14 L Autonomie avec du GNC : 400 km Autonomie avec l'essence : 150 km Emission du CO₂ : 139 g/km Couple : 210 Nm</p>	
---	--

Figure 2. 11 Caractéristiques techniques de la Opel Zafira 1.6 Turbo GNC

- Opel Zafira Tourer 1.6 Turbo GNC

<p>Puissance du moteur : 110 kW Capacité du GNC : 25 kg Capacité du carburant : 14 L Autonomie avec du GNC : 530 km Autonomie avec l'essence : 150 km Emission du CO₂ : 129 g/km Couple : 210 Nm</p>	
---	--

Figure 2. 12 Caractéristiques techniques de la Opel Zafira Tourer 1.6 Turbo GNC

- Opel Combo Tour GNC

<p>Puissance du moteur : 88 kW Capacité du GNC : 22 kg Capacité du carburant : 16 L Autonomie avec du GNC : 450 km Autonomie avec l'essence : 150 km Emission du CO₂ : 134 g/km</p>	
---	---

Figure 2. 13 Caractéristiques techniques de la Opel Combo Tour GNC

- Fiat 500L

<p>Puissance du moteur : 59 kW Capacité du GNC : 14.2 kg Capacité du carburant : 50 L Autonomie avec du GNC : 364 km Autonomie avec l'essence : 760 km Emission du CO₂ : 105 g/km</p>	
---	--

Figure 2. 14 Caractéristiques techniques de la Fiat 500L

- Fiat 500L Living

<p>Puissance du moteur : 59 kW Capacité du GNC : 14.2 kg Capacité du carburant : 50 L Autonomie avec du GNC : 346 km Autonomie avec l'essence : 760 km Emission du CO₂ : 105 g/km</p>	
---	--

Figure 2. 15 Caractéristiques techniques de la Fiat 500L Living

- Fiat Panda

<p>Puissance du moteur : 59 kW Capacité du GNC : 12 kg Capacité du carburant : 35 L Autonomie avec du GNC : 387 km Autonomie avec l'essence : 760 km Emission du CO₂ : 85 g/km</p>	
--	--

Figure 2. 16 Caractéristiques techniques de la Fiat Panda

- Fiat Punto

<p>Puissance du moteur : 51 kW Capacité du GNC : 13kg Capacité du carburant : 45 L Autonomie avec du GNC : 309 km Autonomie avec l'essence : 714 km Emission du CO₂ : 115 g/km</p>	
--	---

Figure 2. 17 Caractéristiques techniques de la Fiat Punto

- Fiat Qubo

<p>Puissance du moteur : 52 kW Capacité du GNC : 13.2 kg Capacité du carburant : 45 L Autonomie avec du GNC : 314 km Autonomie avec l'essence : 692 km Emission du CO₂ : 119 g/km</p>	
---	--

Figure 2. 18 Caractéristiques techniques de la Fiat Qubo

- Fiat Doblo

<p>Puissance du moteur : 88.25 kW Capacité du GNC : 16.15 kg Capacité du carburant : 22 L Autonomie avec du GNC : 297 km Autonomie avec l'essence : 330 km Emission du CO₂ : 134 g/km</p>	
---	--

Figure 2. 19 Caractéristiques techniques de la Fiat Doblo

- Iveco Daily GNC

<p>Capacité du GNC : 53 kg Capacité du carburant : 14 L Autonomie avec du GNC : 580 km Emission du CO₂ : 222 g/km</p>	
---	--

Figure 2. 20 Caractéristiques techniques de la Iveco Daily GNC

- Mercedes Benz B 200 NGT

<p>Puissance du moteur : 115 kW Capacité du GNC : 21 kg Capacité du carburant : 12 L Autonomie avec du GNC : 500 km Autonomie avec l'essence : 200 km Emission du CO₂ : 117 g/km</p>	
--	--

Figure 2. 21 Caractéristiques techniques de la Mercedes Benz B 200 NGT

- Mercedes Benz E 200 NGT

<p>Puissance du moteur : 156 kW Capacité du GNC : 20 kg Capacité du carburant : 59 L Autonomie avec du GNC : 400 km Autonomie avec l'essence : 900 km Emission du CO₂ : 116 g/km</p>	
--	--

Figure 2. 22 Caractéristiques techniques de la Mercedes Benz E 200 NGT

- Volvo V60

<p>Puissance du moteur : 180kW Capacité du GNC : 16 kg Capacité du carburant : 67 L Autonomie avec du GNC : 400 km Autonomie avec l'essence : 900 km Emission du CO₂ : 116 g/km</p>	
---	--

Figure 2. 23 Caractéristiques techniques de la Volvo V60

- Lancia Ypsilon

<p>Puissance du moteur : 59 kW Capacité du GNC : 12 kg Capacité du carburant : 40 L Autonomie avec du GNC : 387 km Autonomie avec l'essence : 760 km Emission du CO₂ : 86 g/km</p>	
--	--

Figure 2. 24 Caractéristiques techniques de la Lancia Ypsilon

- Suzuki Vitara

<p>Puissance du moteur : 89 kW Capacité du GNC : 15 kg Capacité du carburant : 47 L Autonomie avec du GNC : 350 km Autonomie avec l'essence : 880 km Emission du CO₂ : 123 g/km</p>	
---	---

Figure 2. 25 Caractéristiques techniques de la Suzuki Vitara

2.2 Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu différents exemples des véhicules qui roulent avec le GNC, et on a montré leurs caractéristiques techniques. Le nombre de constructeurs offrant des véhicules équipés du GNC ne cesse de croître, car les spécialistes du domaine ont bien compris qu'il s'agit d'une application très prometteuse.

Chapitre 3 Technique de conversion des moteurs à combustion interne en dédié GNC

Un moteur dédié Gaz Naturel Comprimé est un moteur qui utilise le GNC à 100% comme carburant. Ces moteurs sont fabriqués ou obtenus après une conversion d'un moteur à essence ou d'un moteur diesel. Les voitures équipées avec ce type de moteur ont deux réservoirs, l'un pour le GNC et l'autre pour l'essence ou pour le gasoil.

Dans notre étude, on s'intéresse aux moteurs dédiés GNC qui sont obtenus à partir d'une conversion d'un moteur en fonction.

Pour la conversion, on distingue deux cas :

- La conversion des moteurs diesel.
- La conversion des moteurs à essence.

Pour la conversion des moteurs à essence, généralement, il suffit juste d'ajouter un Kit de conversion qui assure l'admission du GNC au moteur. Par contre, pour la conversion des moteurs diesel, il faut apporter des modifications sur le moteur avant l'ajout du kit de conversion.

On détaillera dans ce chapitre les composants du kit de conversion et les modifications nécessaires sur le moteur pour aboutir à un moteur dédié GNC à partir d'un moteur diesel.

3.1 Conversion des moteurs diesel en dédié GNC [5]

Dans cette transformation, le moteur diesel doit être reconstruit pour fonctionner avec le GNC. Le moteur sera converti en système d'inflammation par bougies (cycle Otto). Pour cela quelques modifications structurelles sont nécessaires pour obtenir un taux de compression approprié et un mélange gaz-air adéquat.

En fait, chaque moteur doit être modifié d'une façon différente. Il n'existe pas une règle générale valable pour toutes les marques ou types de moteur.

On va citer d'une façon générale les modifications nécessaires sur un moteur à gasoil pour qu'il puisse fonctionner en 100% GNC.

3.1.1 Les modifications nécessaires au niveau des organes du moteur

Ici, nous proposons une explication plus détaillée des modifications de base qui doivent être effectuées sur les parties internes du moteur afin d'ajouter le kit de conversion.

3.1.1.1 Modification au niveau du piston

La conversion d'un moteur Diesel implique la réduction du taux de compression original à une gamme de 10.0/12.0 : 1 (ou encore plus bas) qui est l'optimum pour une combustion GNC correcte. Dans ce but il est nécessaire d'augmenter la capacité du cylindre enlevant du matériel de la tête du piston.

Auparavant, il y a eu quelques tentatives d'atteindre le même résultat insérant un masque d'entretoise métallique ou un rebord entre le bloc du moteur et les culasses mais les résultats obtenus n'ont pas été satisfaisants à cause des problèmes dynamiques et de température survenue pour quelques raisons. De plus, la chambre de combustion non formée ne permet pas toujours les turbulences nécessaires. Cette solution a été, en fait, généralement abandonnée.

L'opération de manipulation du piston peut être faite seulement après une étude prédictive du corps et de l'épaisseur des parois du piston même. Pour cette étude, il est fondamental de scier longitudinalement le piston pour en vérifier la consistance et la localisation des passages d'huile de refroidissement.

L'action de creuser le piston sera faite avec un tour de banc et avec considération des éléments suivants :

- La tête du piston devrait résulter d'une forme qui puisse favoriser les turbulences nécessaires pour le correct mélange d'air et gaz et obtenir, comme ça, une combustion optimale.
- Dans la préparation du piston, il faudra considérer que les parois devraient garder une épaisseur minimale d'environ 10 millimètres, tandis que l'épaisseur substantielle au niveau des conduits de l'huile doit compter sur un minimum de 4 ou 5 millimètres.

3.1.1.2 Modification au niveau de la culasse

La culasse doit être modifiée pour permettre le logement des bougies. Dans le but de simplifier le travail et éviter de creuser des trous complémentaires dans la culasse, il est mieux d'utiliser les mêmes trous des injecteurs Diesel, dûment élargis et filetés.

Parfois, le trou des injecteurs n'est pas localisé dans l'emplacement idéal de la chambre de combustion pour permettre aux bougies d'allumer correctement le mélange air-gaz, mais la seule solution viable est de forer très soigneusement dans les trous des injecteurs diesel originaux, toujours en évitant de se rapprocher aux conduites d'eau de refroidissement. Une attention spéciale doit être donnée à l'emplacement des soupapes parce qu'il pourrait y avoir le

risque que, en forant un trou trop grand pour les bougies, l'intégrité des valves puisse être mise en danger ou que quelques conduits d'eau existants soit endommagé. Il est donc nécessaire de scier un exemplaire de la culasse du moteur et vérifier la viabilité de cette opération.

3.1.1.3 Modification au niveau de la soupape a papillon

La soupape a papillon du gaz est fabriqué conformément et conçue spécifiquement pour satisfaire les particularités des moteurs à gaz. Son installation est conditionnée à la détermination « a priori » de l'emplacement correct sur le collecteur d'aspiration pour pouvoir assurer le meilleur débit possible du mélange Air-gaz et le plus uniforme à tous les cylindres. L'alimentation non équilibrée du carburant aux cylindres, cause des incréments de température dans l'ordre des 100°C avec quelques évidents problèmes pour le moteur.

L'emplacement optimal pour un moteur de 6 cylindres par exemple est, normalement, le milieu du collecteur d'aspiration, pour obtenir une alimentation équilibrée et des températures à un niveau acceptable.

3.1.1.4 Modification au niveau des sièges des soupapes

Les sièges des soupapes doivent normalement être remplacées. Sur les moteurs Diesel de plus vieille génération, on remarque une haute usure des sièges avec une résultante perte d'efficacité. Dans les années dernières, avec l'augmentation des performances et pour les caractéristiques des moteurs, ces sièges ont été construits avec des matériaux plus résistants. Néanmoins, la substitution systématique des sièges des soupapes originales avec d'autres en acier spécial. Parfois il pourrait être recommandé de remplacer aussi les soupapes originales avec de nouvelles, spécifiques pour le gaz et produites avec un acier plus résistant.

3.1.2 Composants de kit

Un exemple de kit de conversion classique pourrait être composé de :

- 1- Un régulateur de pression qui travaille à 12-24 Volts
- 2- Indicateur avec senseur de pression qui opère jusqu'à 400 bar
- 3- Soupape solénoïde pour GNC
- 4- Tuyau de basse pression avec flexible tressé en acier.
- 5- Unité de commande électronique (ECU)
- 6- Bougies d'allumage
- 7- Câbles de bougies
- 8- Déclencheur du passage gaz

- 9- Mixer gaz/air
- 10- Soupape à papillon
- 11- Détecteur de position d'accélérateur
- 12- Catalyseur de réduction d'oxydation
- 13- Injecteurs du gaz
- 14- Siège spécial des soupapes
- 15- Soupapes spéciales

3.1.3 Système de stockage du Gaz en haute pression

- 1- Cylindres spécifiques pour GNC en acier, sans soudage
- 2- Tuyaux pour haute pression
- 3- Cônes et férules pour les connections
- 4- Détenteurs en acier pour les cylindres

Remarque

Cette liste de composants peut changer selon le type/marque du moteur et être modifiée en fonction des valeurs de polluants exigées.

3.1.4 Moyen d'amélioration de performance

La conversion du moteur à gasoil en moteur 100% GNC va causer une chute de puissance. Pour cela l'ajout d'un turbocompresseur est très recommandé dans le cas des moteurs à gasoil refroidis par eau pour récupérer la puissance perdue à cause de la transformation, dans le cas des moteurs refroidis à air l'ajout du turbocompresseur est déconseillé car le système de refroidissement à air ne sera pas en mesure d'éliminer l'augmentation de température au niveau du moteur.

3.2 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté des techniques de conversion d'un moteur à combustion interne, type DIESEL en un moteur dédié GNC. On a illustré les différentes modifications nécessaires à apporter sur les différents organes du moteur. Cette étude est fondamentale dans le domaine de la motorisation pour mieux maîtriser la conversion qui s'avère une solution technique très importante pour répondre à la situation critique que le monde actuel vit.

Chapitre 04 Etude économique de la conversion du moteur Diesel en dédié GNC

La plupart des propriétaires des voitures équipées avec des moteurs à gasoil aimeraient connaître le coût de la transformation d'un moteur diesel en un moteur dédié GNC. Puisqu'ils veulent participer à la réduction de la pollution atmosphérique et économiser de l'argent, le GNC est une solution alternative car sa combustion émet moins de gaz polluants que la combustion du gasoil, en plus qu'il est moins cher que les autres carburants.

Dans ce chapitre, on va faire des estimations financières pour la transformation d'un moteur Diesel en moteur dédié GNC, et ceci en estimant chaque modification nécessaire afin d'aboutir au coût total de la conversion.

4.1 Estimation du coût de la conversion

Comme déjà indiqué dans le chapitre 03, la conversion d'un moteur Diesel à 100% GNC se fait par des modifications sur les organes du moteur avant d'ajouter le kit de conversion.

Puisque on n'a pas choisi un moteur spécifique pour notre étude, pour tout ce qui suit, les chiffres qu'on va présenter sont à titre indicatif où seront très proches des chiffres réels.

4.1.1 Coût des modifications nécessaires au niveau des organes de moteur

4.1.1.1 Coût de la modification au niveau du piston

Il y aura des modifications au niveau de la tête du piston (voir chapitre 03), ces modifications seront faites sur des machines d'usinage, et le tableau 4.1 représente le coût de cette modification :

Tableau 4. 1 Coût de la modification des pistons du moteur

Type de moteur	Coût de la réalisation (DA)
Moteur à 4 piston	2400
Moteur à 6 piston	3600

4.1.1.2 Coût de la modification au niveau de la culasse

Il y aura des modifications au niveau de la culasse (voir chapitre 03), ces modifications seront faites sur des machines d'usinage, et le tableau 4.2 représente le coût de cette modification :

Tableau 4. 2 coût de la modification du la culasse

Type de moteur	Coût de la réalisation (DA)
Moteur à 4 piston	5000 DA
Moteur à 6 piston	7000 DA

4.1.1.3 Coût de la modification au niveau de la soupape a papillon

Il y aura des modifications au niveau de la soupape à papillon (voir chapitre 03), ces modifications seront faites sur des machines d'usinage, et le tableau 4.3 représente le coût de cette modification :

Tableau 4. 3 coût de la modification du la soupape à papillon

Type de moteur	Coût de la réalisation (DA)
Moteur à 4 piston	2000 DA
Moteur à 6 piston	3000 DA

4.1.1.4 Coût de la Modification au niveau des sièges des soupapes

Il y aura des modifications au niveau des sièges des soupapes (voir chapitre 03), ces modifications seront faites sur des machines d'usinage, et le tableau 4.4 représente le coût de cette modification :

Tableau 4. 4 coût de la modification des sièges des soupapes

Type de moteur	Coût de la réalisation (DA)
Moteur à 4 piston	3200
Moteur à 6 piston	4500

4.1.2 Coût du Kit de conversion et le système de stockage :[6][7]

Dans le tableau 4.5 on va présenter les prix des composants du Kit de conversion et les composants du système de stockage.

Tableau 4. 5 Prix du kit et le système de stockage

Composants	Prix en DZA
Tuyau de basse pression avec flexible tressé en acier.	[1150-2500]
Unité de commande électronique (ECU)	[5500-11000]
Bougies d'allumage	[1200-4000]
Câbles de bougies	[800-1000]
Déclencheur du passage gaz	[2200-5500]
Mixer gaz/air	[2500-4000]
Injecteurs du gaz	[6000-8000]
Siège spécial des soupapes	[980-1700]
Soupapes spéciales	[3000-7000]
Cylindres spécifiques pour GNC en acier, sans soudage	[2200-22000]
Tuyaux pour haute pression	[1500-2000]
Détenteurs en acier pour les cylindres	[7000-9900]

Remarque :

Le coût de la main d'œuvre pour l'installation du Kit varie entre 20000 et 30000 DZA

4.1.3 Le coût global de la transformation

On va présenter dans le tableau 4.6 le devis indicatif d'une conversion dédiée GNC des moteurs Diesel.

Tableau 4. 6 Devis d'une conversion en dédié GNC

Type de moteur	Coût en DZA
Moteur à 4 piston	[86430-159200]
Moteurs à 6 piston	[91830-164700]

4.2 Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à une étude financière dans le but d'estimer les couts de conversion d'un moteur Diesel vers un moteur GNC à travers un travail de recherche sur les couts de modification et des éléments à ajouter selon différents fournisseurs. Une telle étude est très importante, il est en effet intéressant d'améliorer ou de modifier des moteurs pour des raisons particulières, mais l'estimation des coûts de ces arrangements est un facteur important dont il faut tenir compte avant de passer à la mise en œuvre.

Conclusion Générale

Les transports routiers sont responsables de 24% des émissions de gaz à effet de serre, de 50% des émissions d'oxyde d'azote, polluants par ailleurs identifiés parmi les précurseurs de la détérioration de la couche d'ozone et de 25% des émissions de particules fines.

Dans le domaine de la lutte contre le changement climatique, un véritable défi est à relever et les objectifs sont de diviser par 4 à 5 les émissions d'ici 2050.

Le gaz naturel comprimé fait partie des éléments de la politique environnementale mise en œuvre pour réduire les émissions des polluants. Il est considéré comme un carburant alternatif d'excellence pour des raisons aussi bien économiques qu'environnementales.

A cet effet des études et des travaux se font actuellement dans le but de l'utilisation du GNC pour l'alimentation de maximum de véhicules. En général ces travaux consistent à convertir les moteurs qui fonctionnent avec les carburants traditionnels (essence, gasoil) vers des moteurs qui fonctionnent à 100% en GNC.

Dans ce contexte, nous avons fait une étude technico-économique pour mettre en évidence et illustrer les techniques de conversion d'une part et pouvoir estimer le coût de conversion d'une autre part.

La partie technique par laquelle on a commencé, consistait à étudier les étapes de la conversion ainsi que l'ensemble des modifications à apporter sur les différents organes du moteur pour la réalisation de cette dernière. Ensuite, nous avons fait une étude économique où nous avons estimé les coûts de chaque modification et les prix de chaque élément à ajouter.

Nous avons abouti à des prix de conversion variant de 86430 DA à 159200DA pour des moteurs à 4 pistons, et de 91830 DA à 164700 DA pour les moteurs à 6 pistons.

Ces couts auxquels on a abouti, ont été estimés à partir d'une recherche et des consultations des offres des différents fournisseurs. La conversion semble d'un cout très raisonnable, du moment que l'utilisation des véhicules est de plus en plus importante dans notre quotidien. Il s'agit d'un investissement très rentable avec la perturbation dans le secteur pétrolier et la variation régulière des prix du baril de pétrole qui connait une instabilité importante par rapport au gaz naturel.

Finalement, on a essayé d'avancer des estimations financières pour des calculs économiques rentables. Mais on ne pourra jamais estimer les biens apportés à l'environnement car si la conversion nous fait économiser notre argent, en parallèle, la protection de notre planète n'a pas de prix.

Références bibliographiques

- [1] Guibet, J.C. (1997) - '*Carburants et Moteurs*'-Tomes 1 et 2, Publications de l'Institut Français du Pétrole, Edition Tecnip, Paris
- [2] SAE International. (1991) - '*Gaseous Fuels for Engines*' - SAE SP-888 ISBN 1- 56091-184-0 p92
- [3] Nylund N.O. and Lawson A. (2000) - '*Exhaust Emissions from natural gas vehicles*' - IANGV Emission Report
- [4] <http://www.ngva.be/fr/vehicules> consulté le 20/06/2016
- [5] Catalogue NGV Motori srl ; PROFIL DE LA COMPAGNIE et DESCRIPTION DE SON ACTIVITÉ ; www.ngvmotori.it
- [6] <https://www.alibaba.com> consulté le 21/06/2016
- [7] <http://www.piecesauto24.com/> consulté le 21/06/2016